

磁界解析応用によるタービン発電機の電気設計の高度化に関する研究

著者	湧井 真一
号	54
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第4275号
URL	http://hdl.handle.net/10097/61572

氏 名	わくい しんいち 湧井 真一
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成22年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)電気・通信工学専攻
学位論文題目	磁界解析応用によるタービン発電機の電気設計の高度化に関する研究
指導教員	東北大学教授 一ノ倉 理
論文審査委員	主査 東北大学教授 一ノ倉 理 東北大学教授 濱島 高太郎 東北大学教授 松木 英敏

論文内容要旨

電力発生の多くは水力, 火力, 原子力などの大形発電プラントが担っている。この火力, 原子力発電の原動機は蒸気タービンおよびガスタービンであり, タービンによって駆動される発電機がタービン発電機である。

近年, タービン発電機は低価格化に対する要求が高まり, その一対応策として小形軽量化による高出力密度化が進められる傾向がある。高出力密度化のためには, 巻線電流密度および鉄心磁束密度を高める方法があるが, 高磁束密度化によって回転子および固定子鉄心の磁気飽和の問題が生じる。

タービン発電機の電気設計では, 要求仕様に合った電気特性を持つ構造を見出さなければならない。しかし, 電気特性は機内磁束分布の影響を受け, この磁束分布は運転条件および磁気飽和の程度によって大きく変わる。このため, 電気設計では磁気飽和を考慮して機内磁束分布を正確に計算することが重要である。しかし, 現行の発電機は, 無負荷飽和特性や三相短絡特性と, これまでのデータベースをもとに設計されているため, 負荷時の電気特性を正確に把握した設計とは言えない。本来, 発電機の性能は負荷時の特性に基づいて決定されるべきものであり, 特に高磁束密度化設計を行う場合には, 負荷時の電気特性を把握して, 定格負荷時に最適な構造にする必要がある。

また, タービン発電機の高出力密度化を行う上での問題の一つに, 発電機端部の漏れ磁束の増加による固定子鉄心端部の過熱が挙げられる。よって, 高出力密度化のためには, 発電機の固定子鉄心端部の磁束分布および端部構造物に流れる渦電流の分布を詳細に把握する必要がある。

一方, 近年, タービン発電機をサイリスタモータとして駆動するサイリスタ始動方式が実用化され始めているが, タービン発電機の回転子が塊状鉄心であることから, サイリスタ電源の供給するひずみ波電流によって高調波磁束が機内に発生すると, 回転子の誘導加熱や脈動トルクなどの問題が指摘される。

したがって、高調波磁束が与える影響について、高精度な評価が求められている。

ここで、機内磁界を有限要素法で数値的に解析すれば、鉄心の非線形磁気特性を考慮することが可能であるとともに、発電機の構造と特性を関係付けることが容易である。また、磁界解析技術は年々進歩しており、近年では三次元磁界解析の手法が確立され、解析に要する計算時間が実用に耐えられる域に達している。よって、二次元および三次元磁界解析を有効に活用することで、高精度に電気性能を評価できるため、電気設計の高度化が可能となる。

本論文では、これまで述べた背景のもと、磁界解析により、①負荷状態が変化したときのリアクタンスの変化を解明し、高磁界化に適した発電機構造を明らかにすること、②得られた成果を 710MVA タービン発電機に反映させること、③タービン発電機の固定子端部や回転子の電磁氣的諸量を明らかにし、これらの電磁氣的諸量と構造との関係を明確にすることを目的とした。

以下に、本論文の概要を述べるとともに、各章で得られた主な結論について述べる。

第 1 章では、本論文の背景と目的を述べるとともに、本論文の構成をまとめた。

第 2 章では、タービン発電機の電気設計を行う上で考慮しておくべき点、および現状の問題点について説明した。すなわち、従来の電気設計法では、磁路を仮定した計算に基づくため、仮定が現実と整合しなくなる高磁界化設計時や、従来と異なる構造を採用する場合などには設計誤差が大きくなる懸念があること、現行の発電機は無負荷時や三相短絡時とこれまでのデータベースを基に設計されており、負荷時の電気特性を把握して、定格負荷時に最適な構造にする必要があることを述べた。さらに、高磁界化設計時は固定子鉄心端部の過熱が問題となるため、固定子鉄心端部の電磁氣的諸量を把握し、その現象を明らかにしておくことが重要であること、タービン発電機をサイリスタモータとして駆動する場合、トルク脈動や回転子に流れる渦電流のふるまいを明らかにしておく必要があることを述べた。

第 3 章では、磁気飽和を考慮した同期機の d q 軸方程式と二次元磁界解析を用いて、任意の負荷状態における界磁電流とリアクタンスを解析する手法について述べ、592MVA タービン発電機に適用して所要界磁電流、リアクタンスの計算値が実測値と良好に一致することを明らかにした。また、本解析手法を用いて、力率に対するリアクタンスの変化を考察した結果、遅れ力率運転時ほど d 軸電機子同期リアクタンスは小さくなるが、 q 軸電機子同期リアクタンスは逆に大きくなることを定量的に明らかにした。リアクタンスの減少は鉄心が飽和するために生じるものであり、定格負荷時に着目して高磁界化設計を行う場合には、 d 軸の磁気飽和の小さい構造が適していることを明らかにした。さらに、飽和時特有の磁氣的結合を示す d 軸と q 軸間相互リアクタンスは、 d 軸および q 軸電機子鎖交磁束がほぼ等しいとき

に最大となり、漏れリアクタンスと同程度の値で無視できない大きさであることを定量的に示した。

第4章では、第3章で用いたリアクタンスおよび界磁電流解析法に基づき、d軸の磁気飽和が小さく、高磁界化に適した回転子構造に関して検討した。その結果、磁極角度を広げると、界磁巻線のターン数が減少するため所要界磁電流は大きくなるが、所要界磁アンペアターンは小さくなり、磁気飽和を小さくできることを明らかにした。また、磁極角度を76度にすると、界磁巻線の銅損が小さくなるため回転子の温度上昇を抑制できること、磁極角度60度のときよりも端子電圧波形はひずむが実用上問題とはならないレベルであることを示した。以上から、高磁界化設計を行う場合、回転子の磁極角度は60～76度の範囲が適していることを明らかにした。以上の検討結果から710MVAタービン発電機に磁極角度76度を採用し、実機の所要界磁電流を実測して計算値とよく一致していることを確認した。

第5章では、発電機の固定子鉄心端部の磁束分布および端部構造物に流れる渦電流の分布等を詳細に把握するため、三次元磁界解析を用いて、鉄心の磁気飽和および端部構造物の渦電流を考慮した解析を行い、固定子鉄心端部の電磁氣的諸量を計算した。その結果、発電機の運転状態によって、固定子鉄心をクランプするプレート（エンドプレート）、そのプレートに入射する磁束を遮蔽するシールド板（フェーシング）での渦電流分布および渦電流損などが異なることを定量的に明らかにした。また、フェーシングの有無でエンドプレートの渦電流損が大幅に異なることを明らかにし、高磁界化設計時にはエンドプレートに入射する磁束の低減が重要であることを示した。

第6章では、タービン発電機をサイリスタモータとして駆動した場合の電磁氣的現象を明らかにした。まず、サイリスタ始動時の現象を定性的に解明するため、同期機のd-q軸等価回路に基づき、機内高調波磁束、界磁回路およびダンパ回路の高調波電流を計算し、それぞれの周波数特性を検証した。次いで、脈動トルクを解析し、脈動トルクの発生機構を整理すると共に、脈動トルクに及ぼすダンパ回路の効果について考察した。その結果、起磁力相差角の値によってダンパ回路が脈動トルクを大きくするように機能する場合と脈動トルクを小さくするように機能する場合があることを明らかにした。さらに、タービン発電機の回転子に用いられる短尺ウェッジに着目し、短尺ウェッジの切れ目における三次元的な渦電流のふるまいを、三次元磁界解析を用いて計算した結果、サイリスタ始動時の渦電流分布がウェッジの長さ、ダンパバーの有無、ウェッジの導電性の有無などで変化することなどを明らかにした。

第7章では、本研究で得られた結果を整理し、本研究の成果および今後の課題と展望について述べた。

以上、本論文では、タービン発電機における各種負荷状態のリアクタンスの変化、高磁界化に適した回転子構造、固定子端部および回転子の電磁氣的諸量と構造との関連に関する研究成果について述べた。

各種運転状態における電磁氣的諸量と構造との関係は、本研究で初めて解明されたものであり、高磁界化設計を進めるうえで有用な指針になるものと考えられる。また、タービン発電機の飽和時に特有な磁氣的結合を考慮してリアクタンスの変化を解明したことは、負荷時の特性に着目して特性改善を進めるうえで有用な計算手法になり得るものと考えられる。図1に本論文の構成を示す。

高磁界化設計に関する検討

第3章 負荷時の界磁電流およびリアクタンス

- ・ 任意負荷状態におけるリアクタンス，界磁電流算定方法の提案と妥当性検証
- ・ 負荷が変化したときのリアクタンスの変化を定量化して，高磁界化設計を行う際の設計指針を明確化

第4章 回転子磁極角度およびスロット構造の最適化

- ・ 高磁界化に適した回転子磁極角度およびスロット深さの選定
- ・ 710MVA機による実証

高信頼性化設計に関する検討

第5章 固定子端部の渦電流解析

- ・ 三次元磁界解析による固定子鉄心端部構造物の磁束密度および渦電流分布の算出と結果の妥当性検証
- ・ フェーシング適用による渦電流損低減効果の定量化

第6章 サイリスタ始動時の動作解析

- ・ d q 軸等価回路によるサイリスタ始動時の定性的な現象（機内起磁力分布，脈動トルク発生要因）の解明
- ・ 三次元磁界解析による回転子渦電流分布および渦電流損の定量化

図1 本論文の構成

論文審査結果の要旨

近年、タービン発電機において、小型軽量化のために動作磁束密度を高く設定する傾向にあり、固定子および回転子鉄心の磁気飽和による損失増加や温度上昇を招いている。さらに、磁気飽和によって漏れ磁束も増大し、発電機端部の構造物における渦電流が増加する。また、時間高調波成分による回転子の誘導過熱や脈動トルクなどの問題も指摘されている。これらの問題を解決するには、空間ならびに時間高調波を考慮した精度の高い解析・設計が必要である。本論文では、有限要素法による磁界解析を用いてタービン発電機の電磁氣的諸量を明らかにし、タービン発電機の高磁界化と高信頼化に関する最適設計を行ったもので、全編7章よりなる。

第1章は緒言であり、本論文の背景および目的を述べている。

第2章では、タービン発電機の電気設計を行う上で考慮すべき事項と、現状の設計法の問題点について考察し、高磁界化には無負荷飽和曲線と三相短絡曲線による従来の設計手法では不十分で、負荷時の特性をもとに設計すべきことを明らかにしている。

第3章では、磁気飽和を考慮した $d-q$ 軸方程式と二次元磁界解析を用いて、任意の負荷時の界磁電流とリアクタンスを算定する手法を提案し、600 MVA級のタービン発電機の解析に適用してその妥当性を明らかにしている。本算定法は、飽和を考慮した精度の高いリアクタンス解析が可能であり、タービン発電機の構造寸法と電気的特性の関係を求めることが容易など、実用的な手法といえる。

第4章では、高磁界化に適した回転子形状について考察を行っている。すなわち、回転子磁極における磁気飽和の緩和を目的として、磁極角度ならびにスロット深さを種々変えたときの電磁氣的特性について検討を行い、最適な磁極角度が存在することを明らかにしている。さらに、これらの解析手法を700 MVA級タービン発電機の設計に適用し、製作した発電機において実測値と計算値が1.4%以内の誤差で一致することを実証している。

第5章では、タービン発電機の固定子端部の渦電流損失の低減を目的として、三次元磁界解析を用いて71 MVAのタービン発電機における固定子鉄心端部の磁束分布と、エンドプレートならびにフェーシングなどの構造物の渦電流分布の計算を行い、実測値と良好な一致を示すことを述べている。これらの結果に基づいて、負荷時の渦電流密度分布の変化を定量的に考察し、フェーシングによってエンドプレートの渦電流損失が著しく低減されることを明らかにしている。

第6章では、タービン発電機のサイリスタ始動時の回転子の渦電流損失と脈動トルクの解析を行っている。まず、 $d-q$ 軸等価回路に基づいてサイリスタ始動時の磁束、渦電流、およびトルクを計算し、これらの結果から高調波の次数と脈動トルクの関係性を明らかにしている。次に、三次元磁界解析によってサイリスタ始動時の回転子の渦電流を計算し、ダンパバーや回転子スロットの磁性くさびが渦電流損失に及ぼす影響を定量的に考察している。

第7章は結言であり、各章の成果をまとめている。

以上要するに本論文は、磁界解析を用いてタービン発電機の負荷時のリアクタンス解析を行い、高磁界化に適した回転子構造を明らかにするとともに、より高度な設計を目的として、固定子端部の渦電流やサイリスタ始動時の回転子渦電流を解析する手法を提案したもので、電気機器工学およびパワーエレクトロニクスの発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。